

Propozycja jawnego uwzględnienia losowego charakteru parametrów w procesie projektowania

Agnieszka Dudzik, Urszula Radoń¹

¹ *Katedra Mechaniki, Konstrukcji Metalowych i Metod Komputerowych, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska, e-mail: agad@tu.kielce.pl, zmbur@tu.kielce.pl*

Streszczenie: Celem niniejszej pracy jest analiza statyczna konstrukcji prętowych w ujęciu probabilistycznym. Parametry projektowe konstrukcji zdefiniowano jako wielkości deterministyczne oraz zmienne losowe. Zmienne losowe nie są skorelowane. Kryterium awarii konstrukcji określają funkcje graniczne związane ze stanem granicznym nośności i użytkowalności. Wyznaczono wskaźnik niezawodności Cornella oraz Hasofer-Linda. Podstawową metodą badawczą jest metoda FORM. W celu weryfikacji poprawności obliczeń zastosowano metody: SORM, Monte Carlo oraz Importance Sampling. Wyznaczono wrażliwość wskaźnika niezawodności na zmienne losowe. W przedstawionych przykładach analizy niezawodności wykorzystano program STAND.

Słowa kluczowe: zmienne losowe, wskaźnik niezawodności, metoda FORM, wrażliwość wskaźnika niezawodności.

1. Wstęp

Do lat trzydziestych XIX wieku bezpieczeństwo konstrukcji wynikało ze stosowania w projektowaniu tzw. metody obciążeń niszczących, wywodzącej się od koncepcji Galileusza [1]. Pod wpływem prac C. A. Coulomba [2], H. Treski [3] i J. J. Guesta [4] ukształtowała się metoda naprężeń dopuszczalnych. Powyższe metody stosowane były w różnych wersjach w normach projektowania konstrukcji budowlanych do końca lat siedemdziesiątych XX wieku. Radykalną zmianę podejścia do projektowania i oceny bezpieczeństwa konstrukcji zapoczątkowały niezależne prace W. Wierzbickiego [5] i N. S. Streleckiego [6]. W pracach tych zaproponowano, by bezpieczeństwo konstrukcji budowlanych traktować jako zdarzenie losowe i analizować metodami rachunku prawdopodobieństwa. Na podstawie tych koncepcji opracowano, stosowaną obecnie w normach, **półprobabilistyczną** metodę stanów granicznych.

W metodzie tej nie operuje się bezpośrednio zmiennymi losowymi X , lecz ich wartościami charakterystycznymi i obliczeniowymi. Wartość charakterystyczna X_k zmiennej losowej X , to wartość, która może zostać przekroczona z pewnym z góry założonym, odpowiednio małym prawdopodobieństwem. Wartość obliczeniowa X_d zmiennej losowej X powstaje przez pomnożenie jej wartości charakterystycznej przez odpowiedni częściowy współczynnik bezpieczeństwa γ . Obliczenia projektowe polegają na sprawdzeniu, czy wartości obliczeniowe spełniają równanie projektowe, właściwe dla danego stanu granicznego. Częściowe współczynniki bezpieczeństwa powinny być tak dobrane, aby spełnienie przez wartości obliczeniowe równania projektowego zapewniało elementowi konstrukcyjnemu odpowiedni stopień niezawodności.

Probabilistyczne metody pozwalają na ilościową ocenę niezawodności konstrukcji. W metodach tych wykorzystywane są informacje o typach rozkładu zmiennych projektowych i ich parametrach. Takie sformułowanie pozwala na jawne uwzględnienie losowości w procesie projektowania. W rezultacie, możliwa jest budowa modelu matematycznego, który pozwala oszacować, jakie jest prawdopodobieństwo określonego zachowania konstrukcji.

Ze względu na sposób obliczenia prawdopodobieństwa awarii metody te dzielimy na:

- aproksymacyjne: FORM, SORM, metoda powierzchni odpowiedzi,
- symulacyjne: klasyczna metoda Monte Carlo, Importance Sampling, Sztuczne Sieci Neuronowe.

W prezentowanej pracy metody symulacyjne były stosowane jedynie do weryfikacji poprawności obliczeń. Podstawową metodą badawczą była jedna z metod aproksymacyjnych FORM. Jako miarę niezawodności, przyjęto tzw. wskaźnik niezawodności Hasofer-Linda [7]. Bardzo dużą zaletą metody FORM jest to, że umożliwia ona obliczenie **wrażliwości wskaźnika niezawodności** na zmianę dowolnych występujących w opisie zadania parametrów praktycznie bez potrzeby dodatkowych obliczeń jako pierwszą pochodną wskaźnika β po zadanej zmiennej. Metoda FORM daje najlepsze rezultaty, gdy istnieje tylko jeden punkt projektowy, funkcja graniczna nie jest silnie nieliniowa, jest różniczkowalna.

2. Program STAND jako narzędzie w analizie niezawodności

W przedstawionych poniżej przykładach analizy niezawodności wykorzystano program STAND. Autorami programu są Knabel, Kolanek, Nguyen Hoang, Stocki, Tazowski, Lasota [8, 9] z Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN. Realizacja zadania niezawodności konstrukcji przy użyciu programu STAND rozpoczyna się od stworzenia modelu obliczeniowego. Użytkownik programu podaje parametry brzegowych rozkładów prawdopodobieństwa zmiennych losowych, a w przypadku zmiennych skorelowanych także współczynniki korelacji wzajemnej. W programie STAND funkcja łącznej gęstości prawdopodobieństwa wektora zmiennych losowych aproksymowana jest za pomocą tzw. modelu Natafa. Model Natafa [10] pozwala na efektywną transformację oryginalnych zmiennych losowych do gaussowskiej przestrzeni standardowej. W obecnej wersji programu do opisu zmiennych losowych przyjmowane mogą być następujące rozkłady prawdopodobieństwa: jednostajny, normalny, log-normalny, wykładniczy, Rayleigha, Gumbela, Frecheta i Weibulla.

Po zdefiniowaniu modelu obliczeniowego użytkownik wprowadza wzór funkcji granicznej w standardowym zapisie matematycznym jako zależność od zmiennych losowych podstawowych i zewnętrznych. W pracy rozpatrywane są dwa typy warunków odpowiedzialnych za stan graniczny nośności i użytkowania. Następny etap to wybór metody analizy niezawodności oraz uruchomienie obliczeń. Zadanie kończy się wygenerowaniem informacji zawierającej wartości prawdopodobieństwa awarii oraz jego wrażliwości na parametry rozkładów prawdopodobieństwa zmiennych losowych.

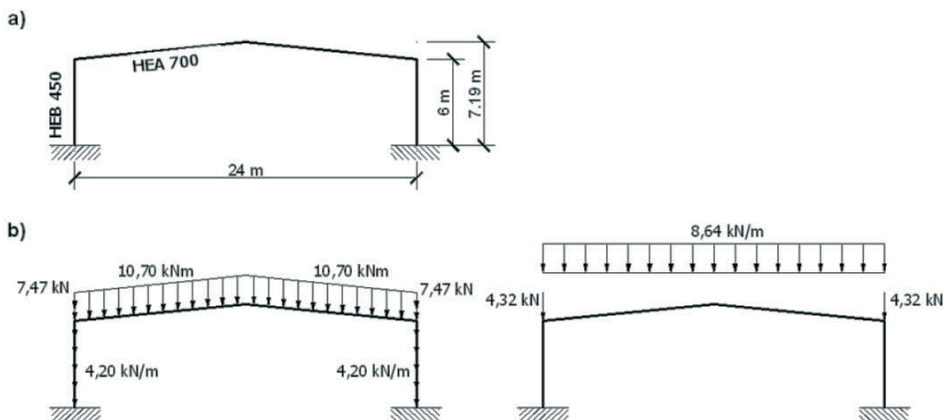
3. Przykłady

3.1. Przykład 1

Analizę niezawodności przeprowadzono dla konstrukcji ramowej hali stalowej (rys.1a). Konstrukcję analizowano przy założeniu liniowo-sprężystego modelu materiału oraz małych przemieszczeń.

Jako wielkości deterministyczne przyjęto: pola przekrojów elementów, ich momenty bezwładności oraz długości słupów i rygli. Poniżej wymieniono wielkości o charakterze probabilistycznym:

- X_1 – obciążenie stałe od ciężaru własnego pokrycia z 1m połaci dachowej,
- X_2 – obciążenie stałe od ciężaru własnego okładziny z 1m ściany osłonowej,
- X_3 – obciążenie stałe z fragmentu obudowy dachu i ściany przy okapie sprowadzona do siły skupionej oddziaływującej na słup konstrukcji,
- X_4 – obciążenie zmienne od równomiernego obciążenia śniegiem połaci dachowej,
- X_5 – obciążenie zmienne z fragmentu dachu i ściany przy okapie sprowadzona do siły skupionej oddziaływującej na słup konstrukcji,
- X_6 – moduł sprężystości dla stali S235JR,
- X_7 – granica plastyczności dla stali S235JR.



Rys. 1. Układ nośny hali stalowej a) schemat ramy, b) obciążenie konstrukcji.

Tabela 1. Opis zmiennych losowych

Zmienna losowa	Rozkład prawdopodobieństwa	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
obciążenie X_1	normalny	4,83 [kN/m]	0,96 [kN/m]	20 [%]
obciążenie X_2	normalny	12,28 [kN/m]	2,46 [kN/m]	20 [%]
obciążenie X_3	normalny	8,59 [kN]	1,9 [kN]	22 [%]
obciążenie X_4	normalny	12,96 [kN/m]	2,6 [kN/m]	20 [%]
obciążenie X_5	normalny	6,48 [kN]	1,42 [kN]	22 [%]
moduł sprężystości X_6	normalny	$231 \cdot 10^6$ [kN/m ²]	$24,26 \cdot 10^6$ [kN/m ²]	10,5 [%]
granica plastyczności X_7	normalny	$263,2 \cdot 10^3$ [kN/m ²]	$30,27 \cdot 10^3$ [kN/m ²]	11,5 [%]

Analizę niezawodności przeprowadzono dla najbardziej niekorzystnej kombinacji obciążeń: obciążenie stałe + równomierne obciążenie śniegiem (rys. 1b). Funkcjami granicznymi nałożonymi na konstrukcję nośną są ograniczenia przemieszczeniowe związane ze stanem granicznym użyteczności oraz ograniczenia naprężeniowe odnoszące się do stanu granicznego nośności. Wstępna analiza stanu przemieszczeń i sił wewnętrznych wykonana za pomocą programu Robot pozwoliła zlokalizować miejsca występowania ich ekstremalnych wartości. Następnie stosując Metodę Elementów Skończonych wyznaczono w programie Mathematica wzór na maksymalne przemieszczenie pionowe

$$q_{\max}(X) = \frac{825,764X_1 + 642829X_2 + 275,255X_3 + 639288X_4 + 275,255X_5}{X_6} \quad (1)$$

oraz maksymalny moment zginający

$$M_{\max}(X) = \frac{33,8188X_2 + 33,6098X_4}{0,00624X_7} \quad (2)$$

w funkcji zmiennych losowych o wektorze: $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7\}$.

Sformułowano funkcje graniczne opisujące:

- stan graniczny użyteczności

$$g_1(X) = 1 - \frac{|q_{\max}|}{q_{dop}} \quad (3)$$

gdzie $q_{dop} = L/250$ oznacza przemieszczenie dopuszczalne wg normy PN-EN 1993-1-1. Dla rozważanej konstrukcji wartość $q_{dop} = 0,096$ m.

- stan graniczny nośności

$$g_2(X) = 1 - \frac{\left| \frac{M_{\max}}{W_s} \right|}{f_y} \quad (4)$$

gdzie W_s – oznacza sprężysty wskaźnik wytrzymałości słupa. Dla profilu HEB 450 wartość $W_s = 0,00624 \text{ m}^3$.

Wykorzystując wzory:

$$\beta = \frac{a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \mu_{X_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i \sigma_{X_i})^2}} \quad (5)$$

oraz

$$\beta = \frac{g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{\text{wartosci srednie}} \sigma_{X_i} \right)^2}} \quad (6)$$

gdzie: $g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n})$ – funkcja graniczna w funkcji zmiennych losowych X_i , a_i ($i=0, 1, 2, \dots, n$) – współczynniki, X_i – niezależne zmienne losowe o rozkładach normalnych, μ_{X_i} – wartość średnia zmiennej losowej, σ_{X_i} – wariancja zmiennej losowej; dla liniowej (5) i nieliniowej (6) postaci funkcji granicznej otrzymano wartość wskaźnika niezawodności Cornella dla stanu granicznego użyteczności $\beta_1 = 2,09$, co odpowiada prawdopodobieństwu awarii na poziomie $p_f = 0,023$ oraz dla stanu granicznego nośności $\beta_2 = 5,09$ co kształtuje zawodność konstrukcji na poziomie $p_f = 1,0 \cdot 10^{-7}$. Następnie wyznaczono wartość wskaźnika niezawodności Hasofera-Linda metodą FORM oraz, dla porównania, innymi stosowanymi metodami niezawodności tj. SORM, Monte Carlo i Importance Sampling. Wyniki zestawiono w tabeli 2. Oszacowano błąd względny wyznaczenia wskaźnika niezawodności Hasofera-Linda przy założeniu, że układem odniesienia jest metoda Monte Carlo (tabela 3).

Tabela 2. Analiza porównawcza obliczania wskaźnika niezawodności

Typ analizy	Wskaźnik Cornella	FORM	SORM	Monte Carlo	Importance Sampling
Stan graniczny użyteczności (funkcja g_1)	2,09	1,8315	1,8294	1,9085	1,8211
Stan graniczny nośności (funkcja g_2)	5,09	3,5301	3,4580	3,7190	3,5079

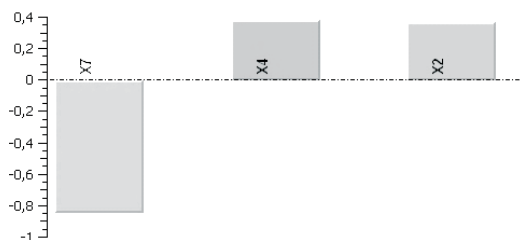
Tabela 3. Błąd względny wyznaczania wskaźnika niezawodności w odniesieniu do metody Monte Carlo

Typ analizy	FORM	SORM	Importance Sampling
Stan graniczny użyteczności (funkcja g_1)	4,035	4,145	4,580
Stan graniczny nośności (funkcja g_2)	5,079	7,018	5,676

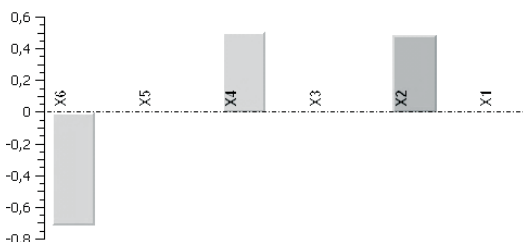
W wyniku przeprowadzonej analizy niezawodnościowej w programie STAND uzyskujemy również informację dotyczącą liczby wywołań funkcji granicznej, a co z tym związane czasu niezbędnego do oszacowania wskaźnika niezawodności (tabela 4). Ponadto otrzymano wykresy obrazujące wrażliwość wskaźnika niezawodności na zmienne losowe dla funkcji granicznej opisującej stan graniczny nośności (rys. 2.) oraz stan graniczny użyteczności (rys. 3.).

Tabela 4. Analiza efektywności numerycznej metody FORM w stosunku do innych metod

Typ analizy	FORM	SORM	Monte Carlo	Importance Sampling
Stan graniczny użyteczności (funkcja g_1)	32	74	4000	532
Stan graniczny nośności (funkcja g_2)	28	40	10000	528



Rys. 2. Wrażliwość wskaźnika niezawodności β na zmienne losowe dla funkcji granicznej opisującej stan graniczny nośności

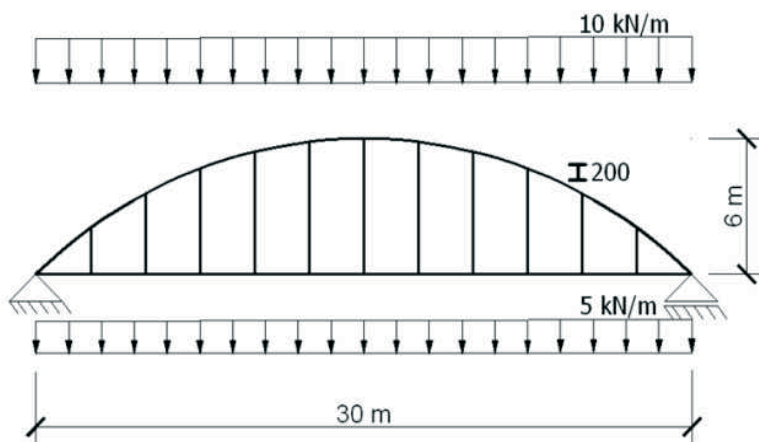


Rys. 3. Wrażliwość wskaźnika niezawodności β na zmienne losowe dla funkcji granicznej opisującej stan graniczny użytkowości

3.2. Przykład 2

W przykładzie 2 analizie niezawodności poddano konstrukcję łuku ze ściągiem i wieszakami obciążoną obciążeniem równomiernie rozłożonym (rys. 4). Element nośny zaprojektowano z dwuteownika 200 wykonanego ze stali S235H o granicy plastyczności $f_y=215$ MPa. Założono, że konstrukcja jest zabezpieczona przed skręceniem oraz utratą stateczności w kierunku prostopadłym do płaszczyzny, w której się znajduje.

Podobnie jak w przykładzie 1 założono liniowo-sprężysty model materiału oraz małe przemieszczenia. Jako wielkości deterministyczne przyjęto: pole przekroju dwuteownika, rozpiętość l i strzałka łuku f oraz kąt ψ – kąt pomiędzy styczną do łuku a poziomem. Wielkości o charakterze probabilistycznym wraz z ich opisem zestawiono w tabeli 5. Ograniczeniem nałożonym na konstrukcję nośną są ograniczenia związane z maksymalną siłą ściskającą odnoszącą się do stanu granicznego nośności.



Rys. 4. Łuk ze ściągiem i wieszakami wraz ze schematem obciążenia.

Tabela 5. Opis zmiennych losowych

Zmienna losowa	Rozkład prawdopodobieństwa	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
obciążenie X_1	normalny	11,5 [kN/m]	1,725 [kN/m]	15 [%]
obciążenie X_2	normalny	5,75 [kN/m]	0,8625 [kN/m]	15 [%]
granica plastyczności X_3	normalny	$240,8 \cdot 10^3$ [kN/m ²]	$27,692 \cdot 10^3$ [kN/m ²]	11,5 [%]

Wiedząc, że siła w ściagu wyrażona jest wzorem:

$$H = \frac{(X_1 + X_2)l^2}{8f} \quad (7)$$

gdzie: l – rozpiętość łuku ($l = 30$ m) oraz f – strzałka łuku ($f = 6$ m), maksymalną obliczeniową siłę ściskającą, którą stanowi siła normalna przy podporze opisuje wzór:

$$N_{ed} = \frac{H}{\cos \psi} = \frac{(X_1 + X_2)l^2}{8f \cos \psi} \quad (8)$$

Funkcja graniczna opisująca stan graniczny nośności ma postać:

$$g_3(X) = 1 - \frac{|N_{ed}|}{N_{b,Rd}} \quad (9)$$

gdzie: $N_{b,Rd}$ – nośność dwuteownika ze względu na wyboczenie wyrażona wzorem $N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot X_3 / \gamma_{M0}$ ($A = 0,00335$ m², $\gamma_{M0} = 1$), χ – współczynnik wyboczeniowy ($\chi = 0,315$). Podstawiając wszystkie dane oraz przechodząc na zapis w funkcji zmiennych losowych o wektorze $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, X_3\}$ otrzymujemy:

$$g_3(X) = 1 - \frac{900(X_1 + X_2)}{0,0396 X_3} \quad (10)$$

Korzystając ze wzoru (6) dla nieliniowej postaci funkcji granicznej obliczono wskaźnik niezawodności Cornella dla stanu granicznego nośności $\beta_3 = 1,47$, co odpowiada prawdopodobieństwu awarii na poziomie $p_f = 0,095$. Podobnie jak w poprzednim przykładzie wyznaczono wartość wskaźnika niezawodności Hasofera-Linda metodą FORM oraz, dla porównania, metodami SORM, Monte Carlo i Important Sampling. Wyniki zestawiono w tabeli 6. Oszacowano błąd względny wyznaczenia wskaźnika niezawodności Hasofera-Linda przy założeniu, że układem odniesienia jest metoda Monte Carlo (tabela 7).

Tabela 6. Analiza porównawcza obliczania wskaźnika niezawodności

Typ analizy	Wskaźnik Cornella	FORM	SORM	Monte Carlo	Importance Sampling
Stan graniczny nośności (funkcja g_3)	1,47	1,2866	1,2865	1,2377	1,2922

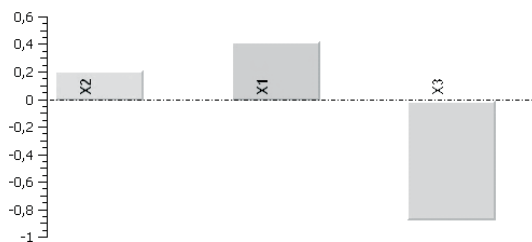
Tabela 7. Błąd względny wyznaczania wskaźnika niezawodności w odniesieniu do metody Monte Carlo

Typ analizy	FORM	SORM	Importance Sampling
Stan graniczny nośności (funkcja g_3)	3,951	3,943	4,403

Podobnie jak w przykładzie 1 uzyskano informację dotyczącą liczby wywołań funkcji granicznej (tabela 8) oraz otrzymano wykres obrazujący wrażliwość wskaźnika niezawodności na zmienne losowe dla funkcji granicznej opisującej stan graniczny nośności (rys. 5.).

Tabela 8. Analiza efektywności numerycznej metody FORM w stosunku do innych metod

Typ analizy	FORM	SORM	Monte Carlo	Importance Sampling
Stan graniczny nośności (funkcja g_3)	20	32	1000	520



Rys. 5. Wrażliwość wskaźnika niezawodności β na zmienne losowe dla funkcji granicznej opisującej stan graniczny nośności

4. Wnioski

Jednym z celów pracy było sprawdzenie, czy proste narzędzie, jakim jest metoda FORM, jest wystarczające do przeprowadzenia analizy niezawodności konstrukcji. Dla porównania w pracy przedstawione zostały inne stosowane metody niezawodności tj. SORM, Monte Carlo, Importance Sampling. Oszacowano błąd względny wskaźnika niezawodności dla poszczególnych metod przy założeniu, że układem odniesienia jest metoda Monte Carlo. Analizując wyniki możemy zauważyć, że błąd ten oscyluje w granicach 4-5% można więc uznać, że metoda FORM jest dostatecznie dokładna. Nie bez znaczenia jest również czas obliczeń, który uwarunkowany jest liczbą wywołań funkcji granicznej. Odnosząc się np. do rezultatów z przykładu 2 do oszacowania prawdopodobieństwa awarii w przypadku metody FORM wystarczy 20 wywołań, w metodzie SORM 32, w metodzie Importance Sampling 520, zaś w metodzie Monte Carlo 1000. Pozwala to wnioskować, że metoda Monte Carlo nie nadaje się do zastosowania w dużych zadaniach niezawodnościowych. Związane jest to jak widać ze znacznym, w porównaniu z metodą FORM, czasem obliczeń oraz brakiem możliwości szybkiego uzyskania wrażliwości otrzymywanego wskaźnika niezawodności na parametry projektowe. Jednak ze względu na dużą dokładność metoda ta służy do oszacowania błędu wynikającego z zastosowania metod pierwszego i drugiego rzędu. Metoda FORM pozwala uzyskać szybką odpowiedź, co umożliwia jej zastosowanie w praktyce inżynierskiej, jako jeden z modułów obliczeniowych programów wspomagających projektowanie konstrukcji.

Niezależnym, ale bardzo istotnym elementem pracy jest badanie wrażliwości wskaźnika niezawodności na zmiany charakterystyk probabilistycznych rozważanych zmiennych losowych. Analizując wyniki otrzymane w przykładzie 1 dla stanu granicznego nośności (rys. 2.) możemy zauważyć, że wrażliwość wskaźnika niezawodności jest największa dla zmiennej losowej X_7 opisującej granicę plastyczności materiału, natomiast najmniejsza dla zmiennej losowej X_2 wyrażającej obciążenie stałe od ciężaru własnego okładziny ze ściany osłonowej. Wyniki obliczeń uzyskane dla stanu granicznego użytkowalności (rys. 3.) wskazują, że wrażliwość wskaźnika niezawodności jest największa dla zmiennej losowej X_6 opisującej moduł sprężystości stali S235JR, zaś najmniejsza (podobnie jak dla stanu granicznego nośności) dla zmiennej losowej X_2 . Wykresy przedstawione w przykładzie 2 (rys. 5.) świadczą o tym, że wrażliwość wskaźnik jest największa dla zmiennej X_3 opisującej granicę plastyczności stali S235H, a najmniejsza dla zmiennej X_2 określającej obciążenie. Znajomość tej wrażliwości ma duże znaczenie w lepszym zrozumieniu pracy konstrukcji. Jeżeli wrażliwość wskaźnika niezawodności ze względu na zmienną losową X jest mała w porównaniu do innych zmiennych to możemy uznać, iż wpływ tej zmiennej na wartość prawdopodobieństwa awarii jest niewielki i w kolejnych obliczeniach traktować ją jako parametr deterministyczny.

Literatura

- 1 Galileo G. L. Discorsi e Dimostrazioni Matematiche. Intornoa due nuove Scienze, Leyden, Holandia, 1638.
- 2 Coulomb C. A. Sur une Application des Regles de maximis et minimis à quelques problemes de statique relatifs à l'architecture. Mem. Acad. Sci. savants etrangers. t. VII, Paris, 1776.
- 3 Tresca H. Memoire sur l'ecoulement des corps solides. Comp. rend., t. 74, 1872.
- 4 Guest J. J. On the strength of ductile materials under combined stress. Philosophical Magazine Series 5, Vol. 50, Issue 302 (1900) 69–132.
- 5 Wierzbicki W. Obiektywne metody oceny bezpieczeństwa konstrukcji budowlanych. PWN, Warszawa, 1966.
- 6 Streleckij N. S. Osnovy statisticeskogo uczeta koeficienta zapasa procznosti sooruzenij. Strojizdat, Moskwa, 1947.
- 7 Hasofer A.M., Lind N.C. Exact and invariant second moment code format, Journal of the Engineering Mechanics Division. ASCE, Vol. 100, (1974) 111–121.
- 8 Knabel J., Kolanek K., Nguyen Hoang V., Stocki R., Tazowski P. Structural reliability analysis using object oriented environment STAND. in proc. of the 36th Solid Mechanics Conference, 9-12 September 2008, Gdansk, Poland.
- 9 Stocki R., Kolanek K., Knabel J., Tazowski P. FE based structural reliability analysis using STAND environment. Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences. Vol. 16, (2009) 35–58.
- 10 Nataf A. Determination des distribution don't les marges sont donnees. Comptes Rendus de L' Academic des Sciences 225 (1962) 42–43.
- 11 Hohenbichler M., Rackwitz R. Non-normal dependent vectors in structural safety. Journal of the Engineering Mechanics Division. ASCE, 107 (1981) 1227–1238.
- 12 Liu P.-L., Der Kiureghian A. Optimization algorithms for structural reliability. Structural Safety 9 (1991) 161–177.
- 13 Nowak A.S., Collins K.R. Reliability of structures. McGraw-Hill Higher Education, 2000.
- 14 Rackwitz R., Fiessler B. Structural reliability under combined random load sequences. Computers & Structures. Vol. 9, Issue 5 (1978) 489–494.

The proposal of explicit account of the random character of design process parameters

Agnieszka Dudzik, Urszula Radoń¹

¹ *Department of Mechanics, Metal Structures and Computer Methods, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology, e-mail: agad@tu.kielce.pl, zmbur@tu.kielce.pl*

Abstract: The study concerns the static analysis of rods structures in terms of probabilism. Structural design parameters are defined as the deterministic values and random variables. Random variables are not correlated. The criterion for structural failure is expressed the limits of functions referring to the ultimate and serviceability limit state. The Cornell and Hasofer-Lind index is used as a reliability measure. The primary research method is the FORM method. In order to verify the correctness of the calculation SORM, Monte Carlo and Importance Sampling methods are used. The sensitivity of reliability index to the random variables is defined. The STAND program is used to present the examples of reliability analysis.

Keywords: random variables, the reliability index, FORM method, the sensitivity of the reliability index.